

文章编号: 1673 5196(2006)01 0126 04

改进型环形收缩试验方法

张凤臣¹, 刘翠兰¹, 陈拥军²

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 南海鸿晖房地产开发有限公司, 广东 佛山 528251)

摘要: 针对当前混凝土学术界研究的热点问题之一——高性能混凝土的收缩, 提出了一种新的、简单的测试高性能混凝土收缩的方法, 即改进型环形收缩试验方法, 详细叙述了改进型环形收缩试验的试验装置、试验方法、试验原理和适用性. 采用该试验方法可以进行高性能混凝土自由收缩的测定、不同约束程度的约束收缩的测定、开裂龄期和开裂趋势的观测. 该试验方法既克服了常用的环形约束收缩试验的缺点, 即无法得到约束应力的信息, 又具有轴向约束收缩试验的某些特点, 即可以得到高性能混凝土的多个早期性能参数, 据此更为准确地评价高性能混凝土的抗裂性能, 揭示高性能混凝土的开裂机理.

关键词: 高性能混凝土; 环形约束收缩; 试验方法; 应力; 应变

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A

Improved experimental method for circular shrinkage

ZHANG Feng chen¹, LIU Cui lan¹, CHEN Yong jun²

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Nanhai Honghui Real Estate Development Co. Ltd., Foshan 528251, China)

Abstract: Aimed at one of the hot issue in the field of concrete research shrinkage of HPC, a new and simple test method for measuring shrinkage of High Performance Concrete (HPC) was proposed, which is called the method of improved circular shrinkage test. The apparatus, procedure, principle and applicability of this new test method was discussed in detail. The new test method can be used to measure the free and various restrained shrinkage of HPC, survey the tendency of shrinkage cracking, and HPC behavior due to restrained. The shortage of conventional circular test, which can not provide the data of stress, is overcome. It also has some characters of uniaxial test, which can identify some parameters of HPC in early age and evaluate the cracking of HPC as well as mechanism of cracking.

Key words: high performance concrete; circularly restrained shrinkage; test method; stress; strain

随着高性能混凝土的应用、发展和近年来普遍产生的混凝土劣化、失效, 高性能混凝土的使用性能受到越来越多的关注, 尤其是高性能混凝土的收缩问题更是成为当今混凝土学术界研究的热点问题之一. 自由收缩对混凝土并无不良影响, 工程中各种混凝土结构都会受到模具、基底、钢筋或者相邻部分的约束, 混凝土收缩由于受到约束而处于受拉状态, 然而混凝土的抗拉强度低, 当拉应力超过其即时抗拉强度时, 就会引起混凝土的开裂现象. 混凝土的裂缝具有记忆性, 若早期的收缩裂缝不及时处理或处理

不当, 就会加速混凝土的劣化, 这不但会影响建筑物的外观、使用功能, 还会对结构安全性和耐久性构成威胁. 关于高性能混凝土收缩的测量各国并无统一标准, 不同学者根据实际情况选择不同的测量方法, 所得结果也就不大一致. 高性能混凝土自由收缩的测定目前用得较多的方法是按国标 GB182—85 规定的普通混凝土干燥收缩的标准方法进行, 成型 100 mm×100 mm×515 mm 的棱柱体试件, 1 d 后拆模, 标养 3 d 后放置于 20±2℃、RH 60±5% 的干燥环境中, 按规定时间测量其长度变化作为混凝土自由收缩值, 实际上是干燥自由收缩值. 高性能混凝土约束收缩试验方法有环形约束^[1~4]、板式约束^[5]和轴向约束试验方法^[6~8]. 目前常用的环形约束和板式约束试验方法属于被动约束, 通过观测试件的

收稿日期: 2005 05 27

基金项目: 甘肃省重大科技成果转化项目(GS023 A52 030)

作者简介: 张凤臣(1971), 女, 河南郑州人, 硕士.

开裂龄期、裂缝宽度和长度来评价混凝土的抗裂性能,其优点是试验装置简单,能够给试件提供足够的约束应力,但其最大的缺点是约束应力不可控,不能提供约束应力的信息,无法将约束应力和开裂有机地联系起来进行理论分析. 轴向约束试验属于主动约束,约束应力可控,试验数据能够提供混凝土的许多早期性能参数,但是此类试验装置价格昂贵,并且在国内正处于研发阶段. 本文所论及的改进型环形收缩试验方法是对常用的环形约束试验的进一步改进,既可以用来进行高性能混凝土的自由收缩试验,又可以进行不同约束程度的约束收缩试验,进一步加大约束程度,还可以进行抗裂试验. 尽管在试验中约束应力不可控,但是约束应力是可知的,根据试验数据可以将约束应力和混凝土的应变动态地联系起来,同样能够得到混凝土的许多早期性能参数,从而进一步揭示高性能混凝土的开裂机理;而且在抗裂试验中,不仅可以从试件表面观测开裂情况,还可以从应变的变化趋势上比普通的环形约束试验方法更为准确地分析试件的开裂时间和裂缝的发展状况.

1 试验装置和试验方法

试验装置和试件如图 1 所示(图中只给出了装置中的内钢环),整套装置包括内钢环、外钢环和底板,图中尺寸单位是 mm.

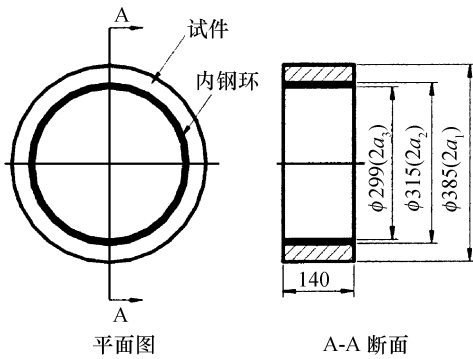


图 1 环形收缩试件

Fig. 1 Test specimen of circular test

改进型环形收缩试验方法是用电阻应变片测量混凝土环及内钢环的应变,从而反映混凝土的收缩情况,具体的试验方法如下所述:将新拌混凝土浇筑在两个钢环之间,成型时根据试验用混凝土的坍落度采用人工振捣或者机械振捣方法使试件密实. 成型后,立即带模在标养室养护 24 h 拆模(根据试验用混凝土的强度发展状况也可以自行决定拆模时间). 测量约束收缩的试件拆除外钢环和底板即可,测量自由收缩的试件需拆除外钢环、底板、内钢环. 将试件放在干燥养护室(20±2 °C, RH 60±5%)中

的平台上,试件底面和平台表面需采取减摩措施以减少混凝土与底板的摩擦力. 测量约束收缩的试件分别在混凝土环外侧和内钢环内侧贴上电阻应变片,测量自由收缩的试件只需在混凝土环的外侧贴上电阻应变片即可. 连接电阻应变仪,设定数据的采集间隔时间,可以得到混凝土环和内钢环的即时应变值.

2 试验原理

2.1 混凝土环的应力应变分析

在工程问题中,通常利用极坐标来分析环形构件的应力场和位移场. 该问题关于 z 轴对称,在平面上实际是关于点对称,就是说环形构件的应力函数与 θ 无关,仅是 r 的函数. 图 2 是其应力示意图. 图中 P(t) 代表 t 时刻混凝土收缩内部钢环对其的径向作用应力. 这里取 P(t) 值为正值,应力方向如图 2 所示.

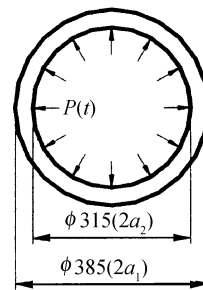


图 2 混凝土环应力分布示意图

Fig. 2 Distribution of internal stresses in concrete circular specimen

由该问题的边界条件可以求得其应力场:

$$\sigma_r(t) = \frac{P(t)a_2^2}{a_1^2 - a_2^2} \left\{ -\frac{a_1^2}{r^2} + 1 \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta(t) = \frac{P(t)a_2^2}{a_1^2 - a_2^2} \left\{ -\frac{a_1^2}{r^2} + 1 \right\} \quad (2)$$

式中 $\sigma_r(t)$ 、 $\sigma_\theta(t)$ 是 t 时刻坐标为 (r, θ) 处混凝土环的径向应力和环向应力; a_1 、 a_2 表示混凝土环的外半径和内半径.

已知 $2a_1 = 385$ mm, $2a_2 = 315$ mm, 分别将 $r = a_1$ 、 a_2 代入式(1)和式(2), 得到:

$$|\sigma_r(t)|_{\min} = 0$$

$$|\sigma_r(t)|_{\max} = P(t)$$

$$\sigma_\theta(t)_{\min} = 4.050P(t)$$

$$\sigma_\theta(t)_{\max} = 5.050P(t)$$

从而有

$$|\sigma_r(t)|_{\max} = 0.198\sigma_\theta(t)_{\max} = 0.247\sigma_\theta(t)_{\min}$$

$$\sigma_\theta(t)_{\min} = 0.802\sigma_\theta(t)_{\max}$$

可以看到最大径向应力是最大环向应力的 19.8%,

是最小环向应力的 24.7%；最小环向应力和最大环向应力相差 19.8%。综合分析后，可以像常用的环形收缩试验一样忽略径向应力的作用，假定环向应力沿径向均匀分布并且沿高度不变，近似认为混凝土环在约束收缩实验中处于环向均匀拉应力状态。在本试验中，是以被测区的环向应力和切向应变代表试件的应力和应变。

实验中，应变片贴在混凝土环的外侧，测得切向应变是 $r = a_1$ 位置处，混凝土试件 t 时刻在拉应力 $P(t)$ 作用下的收缩应变 $\epsilon_1(t)$ ，此位置处的 $\sigma(t) = 4.050P(t)$ 。

将内部约束钢环去掉，用同样尺寸的环形试件来测量混凝土的自由收缩，应变片贴于混凝土环的外侧，测得混凝土的自由收缩 $\epsilon(t)$ 。 $\epsilon(t)$ 包括自身收缩、温度收缩等。

定义混凝土试件在拉应力 $\sigma(t) = 4.050P(t)$ 作用下的拉伸应变为 $\epsilon_2(t)$ 。 $\epsilon_2(t)$ 是弹性应变 $\epsilon_e(t)$ 和恒定应力下的徐变应变 $\epsilon_c(t)$ 之和^[6]：

$$\epsilon_e(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)}$$

$$\epsilon_c(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)}\Phi(t)$$

式中： $E(t)$ 是被测混凝土 t 时刻的弹性模量； $\Phi(t)$ 是 t 时刻的徐变系数，是徐变应变与弹性应变的比值。实验中，混凝土的应力是逐渐发展的，混凝土中的徐变应变要小于恒定应力所引起的徐变值，为此引入龄期系数 $\Omega(t)$ ，对于硬化混凝土一般 $\Omega(t)$ 为 0.6 ~ 0.9，对于早期混凝土一般为 0.9 ~ 1.0。由此徐变应变 $\epsilon_c(t)$ 可以表示为

$$\epsilon_c(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)}\Phi(t)\Omega(t)$$

这样 $\epsilon_2(t)$ 就可以表示为

$$\epsilon_2(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)}(1 + \Phi(t)\Omega(t)) \quad (3)$$

混凝土试件的这三种收缩关系式为

$$\epsilon(t) = \epsilon_1(t) - \epsilon_2(t) \quad (4)$$

由式(3)和 $\sigma(t)$ 的数值，式(4)可以写成：

$$\epsilon(t) = \epsilon_1(t) - \frac{4.050P(t)}{E(t)}(1 + \Phi(t)\Omega(t))$$

根据 Bazant 的定义，龄期有效模量 $E_{eff}'(t)$ 为

$$E_{eff}'(t) = \frac{E(t)}{1 + \Phi(t)\Omega(t)}$$

由此式(4)可以写成：

$$\epsilon(t) = \epsilon_1(t) - \frac{4.050P(t)}{E_{eff}'(t)} \quad (5)$$

综上所述， $\epsilon(t)$ 、 $\epsilon_1(t)$ 的值是由电阻应变片测得的，只要知道了 $P(t)$ 值，就可以得到许多参数(约束

收缩应变、约束应力、受拉龄期有效模量等)随时间的变化状况，并且由混凝土环向应力增量和切向应变增量的比值可以得到混凝土任一时刻的割线模量，而 $P(t)$ 值可以通过内钢环的应变值得到。

2.2 内钢环的应力应变分析

图 3 是内钢环应力示意图，图中 $P(t)$ 代表混凝土收缩对内部钢环产生的径向作用应力。这里取 $P(t)$ 值为正值，应力方向如图 3 所示。

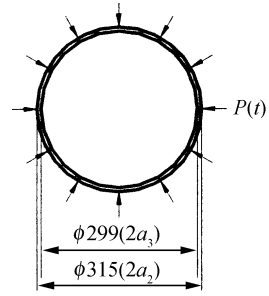


图 3 内钢环应力分布示意图

Fig. 3 Distribution of internal stresses in interior steel ring

采用和混凝土环同样的分析方法，由边界条件可以得到内钢环的应力场：

$$\sigma_r'(t) = \frac{P(t)a_2^2}{a_2^2 - a_3^2} \left\{ \frac{a_3^2}{r^2} - 1 \right\} \quad (6)$$

$$\sigma_\theta'(t) = \frac{P(t)a_2^2}{a_2^2 - a_3^2} \left\{ \frac{a_3^2}{r^2} + 1 \right\} \quad (7)$$

式中： $\sigma_r'(t)$ 、 $\sigma_\theta'(t)$ 是 t 时刻坐标为 (r, θ) 处内钢环的径向应力和环向应力； a_2 、 a_3 表示内钢环的外半径和内半径。

已知 $2a_2 = 315$ mm， $2a_3 = 299$ mm，分别将 $r = a_2$ 、 a_3 代入式(6)和式(7)，得到：

$$|\sigma_r'(t)|_{\max} = P(t)$$

$$|\sigma_r'(t)|_{\min} = 0$$

$$|\sigma_\theta'(t)|_{\min} = 19.201P(t)$$

$$|\sigma_\theta'(t)|_{\max} = 20.201P(t)$$

从而有

$$|\sigma_r'(t)|_{\max} = 0.050 |\sigma_\theta'(t)|_{\max} =$$

$$0.052 |\sigma_\theta'(t)|_{\min}$$

$$|\sigma_\theta'(t)|_{\min} = 0.950 |\sigma_\theta'(t)|_{\max}$$

可以看到最大径向应力是最大环向应力的 5.0%，是最小环向应力的 5.2%，因此忽略径向应力的作用；最小环向应力和最大环向应力相差 5.0%，因此认为环向应力沿径向均匀分布并且沿高度不变。综合分析后，可近似认为内钢环在约束收缩实验中处于环向均匀压应力状态。

实验中，应变片贴在钢环内侧，由钢环内侧的切向应变 $\epsilon'(t)$ 和钢材的弹性模量 E' 可以得到任意时刻的 $P(t)$ 值：

$$P(t) = -0.050E'\epsilon'(t) \quad (8)$$

另外,减小 $2a_3$ 尺寸,即可以加大内钢环对混凝土环的约束程度(S. P. Shah^[1]、Karl Wiegink^[2]、Surendra P. Shah^[3]等在试验中用的尺寸为 $2a_1 = 375$, $2a_2 = 305$, $2a_3 = 254$, 试件高度为 140; David A. Whiting^[4]等在试验中用的尺寸为 $2a_1 = 457$, $2a_2 = 305$, $2a_3 = 267$, 试件高度为 152, 单位均为 mm), 从而可以对混凝土的开裂情况做准确地跟踪。 $\epsilon_1(t)$ 随时间变化的趋势可以反映出裂缝的产生, 当 $\frac{d\epsilon_1(t)}{dt} > 0$ 时, 试件就有微裂缝出现, 而这时在试件外表面和顶面往往是观测不到裂缝的。

3 试验装置的应用实例

图 4 是采用这套试验装置测量的三种配合比的混凝土 1、2、3 的约束收缩应变曲线。混凝土应变片的灵敏系数为 $2.20 \pm 1\%$, 电阻应变仪的分辨率为 $1 \mu\epsilon$, 基本误差限不大于 $\pm 0.1\% \pm 2 \mu\epsilon$ 。混凝土成型后, 立即放入标养室, 24 h 拆模后将试件放置于 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、RH $60\% \pm 5\%$ 的干燥环境中, 贴应变片, 连接好应变仪, 从 30 h 开始测量, 设定每 30 min 读取一次数据。

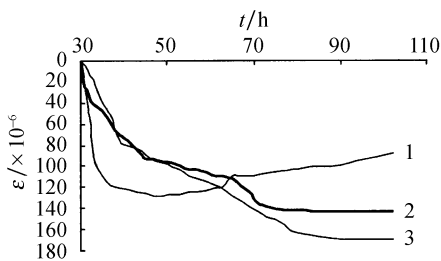


图 4 高性能混凝土的约束收缩

Fig. 4 Restrained shrinkage of HPC

混凝土 1 的最大约束收缩应变是 128×10^{-6} , 时间是 49 h, 这之后, 应变逐渐减小, 表明混凝土内部已经出现了微裂缝, 而在混凝土表面观察到的裂缝出现时间是 90 h, 由此说明, 借助于约束收缩应变能更准确地确定出裂缝出现时间。从图 4 中可以看到, 混凝土 1 的应变增长率较混凝土 2、3 的要大, 说明混凝土 1 的强度发展快, 但抗裂性能差。混凝土 2、3 的约束收缩应变增长平缓, 在 90 h 后逐渐稳定在 143×10^{-6} 、 170×10^{-6} , 在整个测试过程中没有出现开裂现象, 说明混凝土 2、3 的抗裂性能好, 混凝土 2 的抗裂性能优于混凝土 3。混凝土的内部结构对其抗裂性能有很大程度的影响, 而抗裂性能在一定程度上又反映了内部结构优劣及其耐久性。使用抗裂性能好的混凝土可以减少由于混凝土耐久性不

足给工程带来的高额维修费用^[9]。

4 结束语

改进型环形收缩试验装置简单, 试验原理明确, 能够提供足够的信息用来分析混凝土的即时应变和所受到的即时约束应力, 并且可以将二者动态地联系起来; 既可以得到混凝土的早期性能参数, 也可以准确地分析混凝土的开裂龄期和开裂趋势。由此可以看到改进型环形收缩试验方法既克服了常用的环形约束收缩试验的缺点, 即无法得到约束应力的信息, 又具有轴向约束收缩试验的某些特点, 即可以得到混凝土的多个早期性能参数, 据此更为准确地评价高性能混凝土的抗裂性能。

需要注意的是混凝土是非均质材料, 为消除材料不均匀给试验带来的误差, 混凝土应变片的灵敏度宜高, 规格宜大, 宜连续贴。

本试验装置的不足之处是所用模具均为 Q235 钢, 通常需要 24 h 拆模, 过早拆模往往会造成试件产生裂纹, 所以不宜用来测量混凝土的超早期的收缩。

参考文献:

- [1] SHAH S P, KARAGULER M E. Effects of shrinkage reducing admixtures on restrained shrinkage cracking of concrete [J]. ACI Materials Journal, 1992, 89(3): 289-295.
- [2] KARL W, SHASHIDHARA M. Shrinkage cracking of high strength concrete [J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(5): 409-415.
- [3] SHAN S P, CHENG Sheng, QU Yang. A method to predict shrinkage cracking of concrete [J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(4): 339-346.
- [4] WHITING D A, DETWILER R J. Cracking tendency and drying shrinkage of silica fume concrete for bridge deck applications [J]. ACI Materials Journal, 2000, 97(1): 74-77.
- [5] PARVIZ S, SIAVOSH R. Control of plastic shrinkage cracking with specialty cellulose fibers [J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(4): 429-435.
- [6] KOVLER K. Testing system for determining the mechanical behavior of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage [J]. Materials and Structure, 1994, 27: 324-330.
- [7] RONIT B, ARNON B. Free and restrained shrinkage of normal and high strength concretes [J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(2): 214-217.
- [8] ALTOUBAT S A, LANGE DAVID A. Creep, shrinkage and cracking of restrained concrete at early age [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(4): 323-331.
- [9] 乔宏震, 何忠茂, 刘翠兰等. 高性能混凝土抗硫酸盐侵蚀的研究 [J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(1): 104-105.